DOI: 10.5846/stxb201611172338
车文艳,梁霞,王萍,赵惠燕.UV-B 长期胁迫对麦长管蚜子代种群动态的影响.生态学报,2017,37(24):8549-8555.
Che W Y, Liang X, Wang P, Zhao H Y.Effect on population dynamics of the offspring of *Sitobion avenae* Fabricius (Hemiptera: Aphididae) exposed to long term UV-B stress.Acta Ecologica Sinica,2017,37(24):8549-8555.

UV-B 长期胁迫对麦长管蚜子代种群动态的影响

车文艳,梁 霞,王 萍,赵惠燕*
西北农林科技大学植物保护学院,旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 杨凌 712100

摘要:为了探明 UV-B 长期辐射亲代麦长管蚜 *Sitobion avenae* Fabricius 后对其子代种群动态的影响。采用特定年龄生命表方法,设置不同强度(0,0.50,0.70 mW/cm^2) UV-B 连续多代处理麦长管蚜成虫,统计麦长管蚜分别经历 UV-B 辐射一代,六代,十一代,十五代后其子代麦长管蚜存活率和繁殖力、繁殖参数、种群参数的变化。结果表明:(1)经 UV-B 处理亲代麦长管蚜后,其子代种群的内禀增长率 r 与周限增长率 λ 在低强度处理组各世代之间无显著差异,在高强度处理组各世代之间呈先上升后下降的趋势。(2)处理组麦长管蚜种群繁殖力 F、净增殖率 R_0、平均世代周期 T、产卵天数和成蚜寿命均在 G7 代达到最大值,且与对照组无显著差异。(3)亲代麦长管蚜经 UV-B 胁迫处理后对子代种群的存活率影响显著。研究结论:亲代麦长管蚜经过不同代数的 UV-B 胁迫,可显著影响子代的生长发育与繁殖,且对处于不同世代的子代生态学指标产生不同影响。研究的创新点在于探究亲代麦长管蚜经历紫外胁迫后对其子代生长、发育与繁殖的影响,为逆境胁迫下蚜虫的生态遗传与进化机理提供理论依据。

关键词:麦长管蚜;UV-B 辐射;辐射强度;亲代经历;子代;种群动态

Effect on population dynamics of the offspring of *Sitobion avenae* Fabricius (Hemiptera: Aphididae) exposed to long term UV-B stress

CHE Wenyan, LIANG Xia, WANG Ping, ZHAO Huiyan*
State Key Laboratory of Crop Stress in Arid Areas, College of Plant Protection, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, *China*

Abstract: Recently, ultraviolet-B radiation (UV-B) has been proven to have a strong selection pressure on the biosphere and ecological environment, significantly influencing living organisms. The rapid increase of solar UV-B reaching the surface of the earth is owing to stratospheric ozone depletion caused primarily by the Industrial Revolution. The responses of insect physioecology and growth to ultraviolet radiation enhancement have received increasing attention in the scientific community. *Sitobion avenae* Fabricius (Hemiptera: Aphididae) is a common wheat pest. It affects plants by ingesting sap from the ears, stems, leaves, and other tender plant parts. It also transmits viruses (e.g., barley yellow dwarf virus) during feeding, thereby reducing wheat yield and quality. It is a good subject for research because of its special characteristics of parthenogenesis and high fecundity. The increase of UV-B levels may fundamentally affect the population dynamics of *S. avenae* by altering its normal growth, development, and fecundity. The two-sex life table analysis is a common method to indicate biological growth, development, and fecundity, and includes the entire population (males, females, and those that die before the adult stages), so that the result is more realistic than analyses based only on the means of development time. To explore the effect on population dynamics of the offspring of *S. avenae* by exposing the mother generation to UV-B for a long time, the age-specific life table of *S. avenae* was established to evaluate life-table parameters of offspring of *S. avenae*. The mother generation was radiated to different intensities of UV-B (0, 0.5, 0.7 mW/cm^2) for one, six, eleven, and

基金项目:国家自然科学基金项目(39970112,20470268);高校博士点基金(20130204110004);陕西省科技厅国际合作项目(2012)
收稿日期:2016-11-17; **网络出版日期:**2017-08-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhaohy@nwsuaf.edu.cn

fifteen generations. The results showed that: (1) There were no significant differences in the intrinsic rate of increase (r) and finite rate of increase (λ) among the treatment group of each generation under low intensity of UV-B, whereas the parameters of r and λ first increased and then fell with generations under high intensity of UV-B. (2) The effect of UV-B on the fecundity (F), net reproductive rate (R_0), mean generation time (T), oviposition duration, and adult longevity peaked in the seventh generation. Moreover, no significant difference was found in the seventh generation between the control and treatment groups. (3) When *S. avenae* were under different intensity of UV-B radiation in the same generation, most parameters in the treatments groups were significantly lower than those in the control except the parameter T in the second and sixteenth generation. However, no significant difference was found in the seventh generation between the control groups and treatment groups, whereas F, R_0, T, oviposition days, and adult longevity all had significant differences, but there were no significant differences between other parameters in the twelfth generation. (4) The survival rate of offspring of *S. avenae* exposed to UV-B stress was significantly influenced. Our research showed that the effect of long-term UV-B stress on *S. avenae* was accumulated in the progeny, had different impacts in different generations. Our research showed the population dynamics of the offspring of *S. avenae* after the mother generation was influenced by UV-B; thus, the results may provide a theoretical basis for ecological genetics and evolutionary mechanisms of aphid under adversity stress.

Key Words: *Sitobion avenae*; UV-B radiation; radiation intensity; parental experience; offspring; population dynamics

随着人类社会工业化的进程,大量有毒化学物质排放到空气中,破坏了大气层中的臭氧层,破坏了这道保护生物健康的天然屏障,致使到达地球表面的中波紫外线 UV-B(280—320 nm)的辐射增强,对生态系统中的生物施加了强大的进化动力,对生物的生长发育和繁殖产生显著影响[1-3]。有学者研究发现,紫外光谱可一定程度地控制昆虫的行为,且强度的变化会刺激昆虫体内的识别器,支配昆虫日常的觅食行为及地理分布和活动范围[4-5]。此外,还有学者发现 UV-B 胁迫对植物的光合作用、蒸腾作用、气孔导度以及叶片水势等均有影响,使植物表现出植株矮化、节间缩短、叶面积减小、叶片增厚、叶面积指数降低等症状,改变植物的形态及生理生化反应,间接影响植食性昆虫的生长发育和种群动态[6-12]。

麦长管蚜 *Sitobion avenae* 是麦类作物重要害虫,也是麦蚜中的优势种,其前期集中在叶正面或背面,后期集中在穗上刺吸汁液,致受害植株生长缓慢,分蘖减少,千粒重下降。麦长管蚜全年主要营孤雌生殖产生后代,其生长周期短,繁殖快,对环境变化的适应能力强,是研究长期环境胁迫对生物影响的理想材料。已有研究表明,紫外线胁迫可提高麦长管蚜体内 SOD, CAT 及 POD 活性水平,以更好地适应逆境[13];此外,UV-B 胁迫麦长管蚜也可导致其基因组 DNA 发生变异,且处理时间与变异频率之间存在正相关[14-15]。

母代效应(maternaleffect)是母代所经历的环境(光照、温度和营养) 或所采取的行为(寄主选择、性选择、产卵行为和亲代照料等) 对子代表现型(phenotype)差异的影响,它是母代对子代的非遗传效应[16]。子代个体表现型不只是基因型与环境相互作用的结果,亲代的经历对子代的表现型影响也很大。对昆虫母代效应的研究,有助于更全面理解昆虫生活史的进化方式,并可为昆虫种群的有效管理提供理论基础。目前已知,环境诱导的母代效应在 70 多种昆虫中存在[17],亲代的经历对子代的表型影响很大。Tachibana 等[18]发现丝光绿蝇的亲代在成虫期经历的光周期(LD 12:12)和温度(20℃)对子代幼虫期滞育有深度诱导作用。张欢等[19]发现多次脉冲微波辐照亲代大鼠对其子代的影响具有累积效应,曹亚南等[20]发现极低频电磁场对小鼠子代生长发育可产生不良的影响,张雅君等[21]研究发现紫外线可导致果蝇的后代产生畸变个体。目前有关紫外线对麦长管蚜的胁迫作用多限于考查对其亲代或各发育阶段虫体的生物学效应,而有关亲代效应对子代生长发育和繁殖的影响还没有相关文献报道。弄清 UV-B 长期胁迫亲代麦长管蚜会如何影响子代的生长发育,有利于更加理解昆虫生活史的进化及生化机制,为昆虫种群的有效管理具有重大意义。因此本研究用不同强度 UV-B 长期处理麦长管蚜,通过分析麦长管蚜子代在不同世代的各项生命表参数,探究其子代生态学参数的变化规律,以期明确亲代经历不同代数的 UV-B 胁迫作用对其子代生长、发育与繁殖的影响,对 UV-B 辐射作

用下生物的适应性及对后代的影响有更深层的了解,从而为逆境胁迫下蚜虫的生态遗传与进化机理提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料

1.1.1　供试虫源

供试麦长管蚜为西北农林科技大学昆虫生态学实验室经多代饲养的单克隆种群,饲养条件:温度为21℃;光周期为白天/夜晚=16 h/8 h;相对湿度为(60±5)%。

1.1.2　供试小麦品种

小麦品种为矮抗 58,来源于西北农林科技大学农学院。

1.2　紫外辐射处理

试验处理选用用普通日光灯管及紫外灯管(YZ10-58W 313 nm,中国上海荣波有限公司)作为光源,高强度辐射组(0.70 mW/cm^2)采用 3 支同样规格的紫外灯管及普通日光灯,低强度辐射组(0.50 mW/cm^2)则采用 2 支紫外灯管和普通日光灯,对照组采用普通日光灯管作为光源,其中紫外灯管都均匀分布在普通灯管中间,普通日光灯管用滤光器 UVILEXTM 390 Z(SCHOTT Inc,中国上海)去除灯光中的紫外线,且对紫外灯使用 Schott N-WG280 滤光膜罩上使其所发光线中只有 UV-B 波段的光可以透过。试验麦长管蚜置于培养皿中,培养皿置于灯管下方 30 cm 处,每代成虫分别在低强度和高强度紫外光下辐照 48 h(每天 16 h),待紫外处理后,将培养皿转移到普通日光灯对照组下进行饲养。

1.3　生命表研究

放置一层沾湿滤纸于培养皿(直径 60 mm,NEST 生物技术有限公司)中,挑取新鲜小麦叶片于滤纸上,挑取不同强度 UV-B 辐射后的成虫于叶片上,成蚜所产若蚜部分用作继代观察试验材料继续饲养,待发育为成虫后紫外处理 48 h(每天 16 h),部分用于子代生殖生命表研究,即挑取 2 代,7 代,12 代,16 代若蚜(无 UV-B 辐射)进行生命表研究。1 龄若蚜于小麦叶片上进行单头饲养,每个处理设定 3 个重复,每个重复 20 头蚜虫,每天定时记录其蜕皮、生长及产仔情况,待麦蚜发育至成虫产仔时,将每天所产仔蚜移出培养皿,定时更换新鲜的小麦叶片。

1.4　数据处理

采用特定年龄生命表方法来记录麦长管蚜的蜕皮、生长及产仔情况,所得的原始记录结果采用 TWOSEX-MSChart [22]进行分析,将所得的生命表数据采用 IBM SPSS Statistics 20 分别对紫外强度和世代进行单因素方差分析,各处理间的显著性差异均设为 $P < 0.05$ 水平,用 Sigma Plot 12.5 作图。

2　结果

2.1　不同辐射强度 UV-B 胁迫下麦长管蚜子代的存活繁殖曲线

在不同辐射强度的 UV-B 长期胁迫下,麦长管蚜种群特定年龄存活率(l_x)、繁殖力(m_x)以及净生殖力曲线($l_x m_x$)如图 1 所示,其中存活率数值由主坐标轴显示,而繁殖力与净生殖力数值由次坐标轴显示。

同一强度 UV-B 辐射下,低强度处理组的麦长管蚜子代在不同世代之间,存活时间、产仔总时间、繁殖力和净生殖力的高峰点均呈先上升后下降的趋势;高强度处理组的存活时间呈先上升后下降又缓慢回升的趋势,繁殖力和净生殖力的高峰点均呈先上升后下降的趋势。

不同强度 UV-B 辐射下,处理组麦长管蚜种群的子代除第七代外,其他代数中处理组的存活时间和产仔天数均比对照组短,且繁殖力和净生殖力的高峰点较 CK 峰值点小。

由上可知,UV-B 辐射亲代麦长管蚜种群后,对其子代的存活与繁殖有显著影响,对亲本机体造成的损害可传递给子代,间接造成子代蚜虫存活时间短,产卵量少,且不同强度 UV-B 胁迫不同代数麦长管蚜,对其各

世代的子代影响不同。

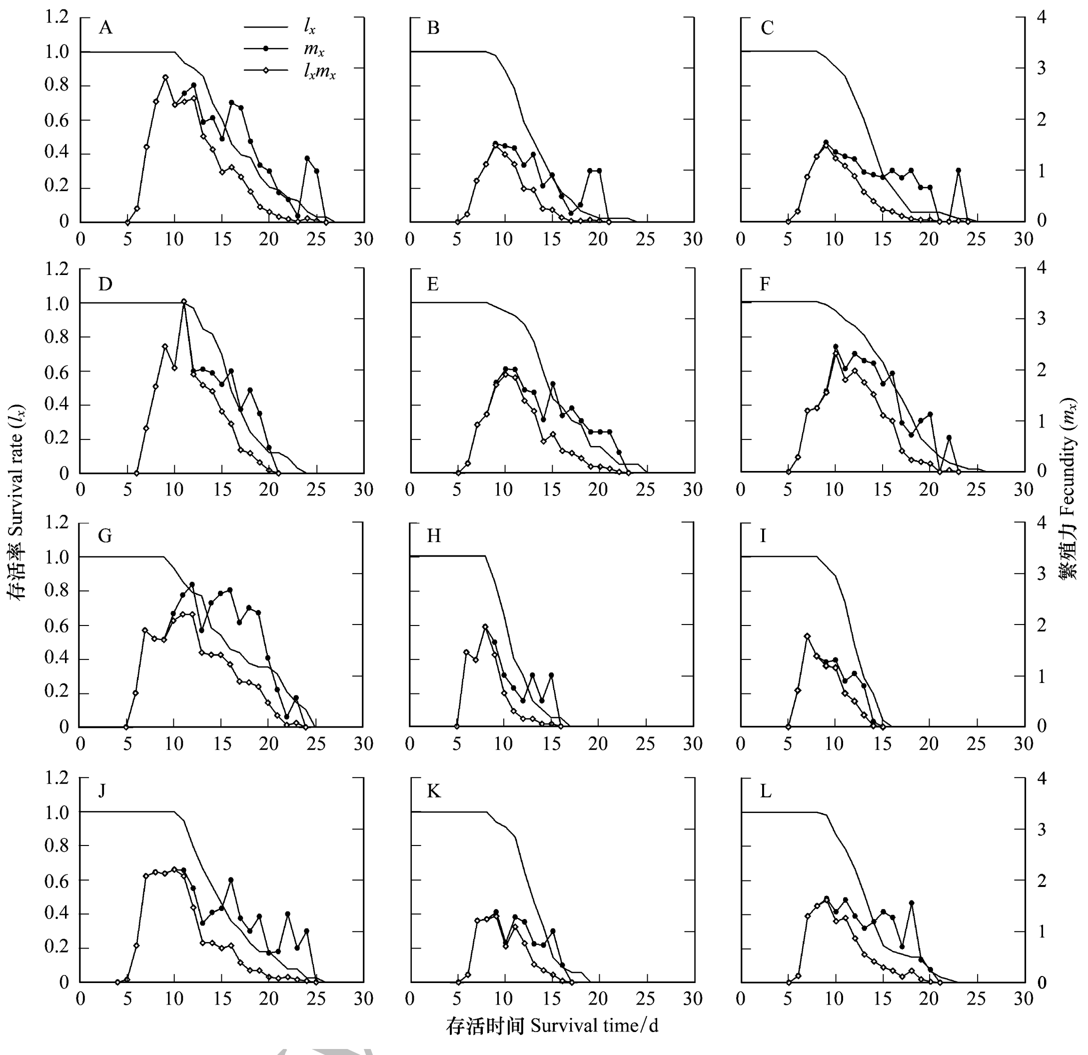


图 1 UV-B 不同辐射条件下麦长管蚜子代在不同世代特定年龄存活率、繁殖力以及净生殖力曲线

Fig.1 Age-specific survival rate (l_x), age-specific fecundity (m_x), and net maternity (l_xm_x) of *Sitobion avenae* under different intensity of UV-B radiation between the different generations

A: 0 mW/cm² UV-B, G2; B: 0.5 mW/cm² UV-B, G2; C: 0.7mW/cm² UV-B, G2; D: 0 mW/cm² UV-B, G7; E: 0.5 mW/cm² UV-B, G7; F: 0.7 mW/cm² UV-B, G7; G: 0 mW/cm² UV-B, G12; H: 0.5 mW/cm² UV-B, G12; I: 0.7 mW/cm² UV-B, G12; J: 0 mW/cm² UV-B, G16; K: 0.5 mW/cm² UV-B, G16; L: 0.7 mW/cm² UV-B, G16

2.2 不同辐射强度 UV-B 胁迫下麦长管蚜子代繁殖参数的变化

由表 1 可知,在不同世代之间,同一 UV-B 辐射强度下,麦长管蚜子代种群的繁殖参数发生显著变化。在低强度处理组的子代种群的繁殖力 F,产卵天数从 G2 代到 G7 代显著增加,而后逐渐降低,成蚜寿命呈先上升后下降又缓慢回升的变化趋势,且 G7 代寿命最长,G12 代寿命最短;在高强度处理组的不同世代,麦长管蚜种群的繁殖力 F,产卵天数和成蚜寿命从 G2 代到 G7 代显著增加,而后逐渐降低又缓慢回升,且均在 G12 代达到最小值。

在同一世代,不同 UV-B 辐射强度下,麦长管蚜种群子代在 G2 代,G12 代和 G16 代,对照组与处理组之间各种群繁殖参数差异显著;G7 代对照组与处理组之间各种群繁殖参数差异不显著。

由上可知,长期 UV-B 胁迫对亲代麦长管蚜的影响可以传递到子代,且母代经历不同代数胁迫,各世代间母代效应的表现不同,G7 代母代效应不显著,G12 代母代毒害效应表现最显著。

表 1　不同辐射强度 UV-B 胁迫后麦长管蚜子代的繁殖参数比较

Table 1　Comparison of the fecundity parameters of offspring of *Sitobion avenae* exposed to different intensities of UV-B radiation

UV-B 辐射强度/(mW/cm^2) UV-B intensity	世代 Generation	繁殖力 F Fecundity	产仔天数/d Ovi-days	成虫寿命/d Longevity
0	G2	21.52±0.90 Aa	6.94±0.08 Aa	17.30±0.21 Aa
	G7	19.06±1.07 Aa	6.33±0.29 Aa	16.97±0.23 Aa
	G12	21.42±1.44 Aa	6.98±0.49 Aa	17.23±0.25 Aa
	G16	16.95±0.99 Aa	6.03±0.29 Aa	16.02±0.20 Ab
0.5	G2	8.03±0.35 Bb	3.36±0.10 Cb	13.84±0.21 Bb
	G7	16.62±1.77 Aa	6.33±0.49 Aa	16.05±0.24 Aa
	G12	7.43±0.67 Bb	3.10±0.15 Bb	11.53±0.25 Cc
	G16	7.16±1.02 Bb	3.71±0.73 Ab	13.51±0.04 Cb
0.7	G2	8.71±0.44 Bb	4.35±0.19 Bb	14.38±0.03 Bb
	G7	16.36±0.13 Aa	6.17±0.30 Aa	16.54±0.38 Aa
	G12	7.60±0.47 Bb	3.38±0.06 Bb	12.56±0.09 Bc
	G16	9.82±1.04 Bb	4.19±0.40 Ab	14.15±0.18 Bb

表中数据为平均值±标准误,n 为 3 次重复。数据后不同小写字母表示同一 UV-B 辐射强度下,不同世代间的显著性差异,不同大写字母表示不同 UV-B 辐射强度下,同一世代间的显著性差异(Student-Newman-Keuls 检验,$P < 0.05$,one-way ANOVA)

2.3　不同强度 UV-B 胁迫下麦长管蚜子代种群参数的变化

由表 2 可知,同一 UV-B 辐射强度下,低强度处理组麦长管蚜子代在各世代之间,内禀增长率 r 与周限增长率 λ 无显著差异,净增殖率 R_0呈先上升后下降趋势,且在 G7 代达到最大值,平均世代周期 T 从 G2 代到 G7 代显著增加,G7 代到 G12 代显著降低,后又显著回升,且在 G7 代达到最大值,G12 代达到最小值;高强度处理组各世代之间,内禀增长率 r 与周限增长率 λ 呈先上升后下降的趋势,净增殖率 R_0与平均世代周期 T 呈先上升后下降又缓慢回升的趋势,且在 G7 代达到最大值,G12 代达到最小值。

不同 UV-B 辐射强度下,麦长管蚜子代种群在 G2 代和 G16 代,对照组与处理组之间内禀增长率 r,周限增长率 λ 和净增殖率 R_0有显著差异,平均世代周期 T 无显著差异,G7 代对照组与处理组间各生命表参数无显著差异,G12 代对照组与处理组间净增殖率 R_0和平均世代周期 T 有显著差异,且对照组显著大于处理组。

由上可知,不同强度 UV-B 长期胁迫麦长管蚜后,G7 代各种群参数表现为不受紫外胁迫作用的影响,母代效应在第七代无显著表现,G7 代表现为解除 UV-B 辐射影响的关键世代。

表 2　不同辐射强度 UV-B 胁迫后麦长管蚜子代种群参数的比较

Table 2　Comparison of the population parameters of the offspring of *Sitobion avenae* exposed to different intensities of UV-B radiation

UV-B 辐射强度 UV-B intensity/(mW/cm^2)	世代 Generation	内禀增长率 r Intrinsic rate of increase	净增殖率 R_0 Net reproductive rate	周限增长率 λ Finite rate of increase	平均世代周期 T Mean generation time
0	G2	0.2691±0.0074 Aa	21.52±0.8989 Aa	1.3089±0.0097 Aa	11.41±0.1999 Aa
	G7	0.2508±0.0069 Aa	19.06±1.0658 Aa	1.2851±0.0088 Aa	11.75±0.1057 Aa
	G12	0.2646±0.0105 Aa	21.42±1.4390 Aa	1.3030±0.0137 Aa	11.58±0.2055 Aa
	G16	0.2668±0.0089 Aa	16.95±0.9854 Aa	1.3059±0.0116 Aa	10.60±0.1379 Ab
0.5	G2	0.1953±0.0094 Ba	8.0306±0.3528 Bb	1.2157±0.0114 Ba	10.6873±0.2982 Aab
	G7	0.2467±0.0081 Aa	16.6154±1.7648 Aa	1.2798±0.0104 Aa	11.3447±0.1270 Aa
	G12	0.2255±0.0160 Aa	7.4365±0.6735 Bb	1.2533±0.0199 Aa	8.9043±0.3661 Bc
	G16	0.1901±0.0166 Ba	7.1641±1.0215 Bb	1.2097±0.0199 Ba	10.2580±0.1183 Ab
0.7	G2	0.2011±0.0062 Bb	8.7115±0.4349 Bb	1.2228±0.0076 Bb	10.7583±0.0998 Ab
	G7	0.2408±0.0040 Aa	16.3606±0.1270 Aa	1.2723±0.0051 Aa	11.6107±0.2037 Aa
	G12	0.2160±0.0094 Aab	7.6024±0.4670 Bb	1.2412±0.0116 Aab	9.3863±0.1782 Bc
	G16	0.2133±0.0119 Bab	9.8167±1.0398 Bb	1.2379±0.0147 Bab	10.6657±0.1113 Ab

3　结论与讨论

紫外线照射对整个生物圈和生态环境造成了很大的选择压力,已成为一种能对生物造成胁迫的环境因子[23]。已有研究表明,UV-B 胁迫生物可产生活性氧和自由基进而破坏生物机体内 DNA、蛋白质、脂质、生物膜以及电子传递链的结构和功能[24-26]。盖民昊等[27]发现在紫外诱导条件下,麦长管蚜细胞色素 b 基因会发生部分突变。本研究仅就 UV-B 长期胁迫麦长管蚜后其子代种群生态学相关指标进行了研究,控制不同紫外强度连续 15 代长期辐射麦长管蚜,通过特定年龄生命表中的存活率和繁殖力、繁殖参数、种群参数等相关参数的变化来评估 UV-B 辐射对麦长管蚜子代生长发育和繁殖的影响,进而探明紫外胁迫对麦长管蚜后代的影响及变化规律。试验结果表明,紫外线诱导麦长管蚜产生的生态学反应是可以传递的,这与都二霞等[28]的研究结果一致。此外,在本实验长期 UV-B 辐射亲代麦长管蚜过程中,母代效应在各世代表现不同,对处于不同世代的麦长管蚜子代各生命表参数产生不同影响,影响其生长、发育与繁殖。

在本实验长期 UV-B 辐射亲代麦长管蚜后,其 G7 代各生命表相关参数显著高于其他世代,且与对照组相比无显著差异,母代效应不显著,这与麦长管蚜种群自身适应环境压力的机制有关,可能是因为母代的毒害效应使得麦长管蚜机体产生适应性反应,即毒物兴奋效应。毒物兴奋效应被认为是一种以双相剂量-反应曲线为特征的适应性反应,公认的剂量反应曲线为 U-型曲线[29-31],该效应的一个著名机制认为生物体受到刺激之后,机体平衡受到破坏,生物体最先表现出对刺激的抑制反应,然后会出现一个补偿过程,这个补偿过程会逐渐超过控制,形成过度表达,从而产生兴奋效应[32]。本实验中 G2 代相关生命表参数受到抑制,G7 代的参数数值出现了上升,与对照无显著差异,又因为紫外的毒害效应对于麦长管蚜的生长是不利因素,随着紫外毒害效应的继续传递,会抑制麦长管蚜种群的生长发育,从而 G12 代蚜虫各生命表参数显著下降。所以在本实验中,G7 代的母代毒害效应可能类似于毒物兴奋效应,是补偿过程中的一个阶段。然而在 G7 代与 G12 代之间的其他世代是否会发生过度表达,产生高于对照的兴奋效应,还需要设置更多的样本量进一步研究。

此外,低强度处理组与高强度处理组的麦长管蚜种群子代在第二代和第十六代之间各生命参数均无显著差异,母代效应表现相似,据此本研究推测亲代麦长管蚜长时间暴露在 UV-B 环境下,其母代效应可能会出现周期性的循环现象。前期环境胁迫增强麦长管蚜的适应能力,随着蚜虫自身的调节,亲代麦长管蚜的毒害效应会逐渐减弱,但随着胁迫代数的累加,UV-B 的剂量累计超过了麦长管蚜的适应范围,其毒害效应再次传递给子代,影响子代的生长发育,麦长管蚜需要再次启动自身的防御体系,如机体内一些保护酶活性的变化或胁迫相关基因表达量增加,以适应胁迫。这也是自然界 UV-B 不断变化而蚜虫能够在胁迫条件下存活并保持种群稳定的原因之一,这是基于本实验的一种推测。关于紫外胁迫对麦长管蚜子代的影响会不会出现周期性循环规律,需要在实验室研究基础上进行更长期的多代研究,从进化的角度阐明母代效应的变化规律,而且这种亲代效应规律是如何导致麦长管蚜遗传进化的,有关 UV-B 胁迫的分子机理以及麦长管蚜相关基因的表达和生理代谢有待进一步深入研究,从而为阐述麦长管蚜的种群应对长期紫外胁迫的遗传进化机制奠定基础。

参考文献(References):

[1] 胡祖庆, 亢菊侠, 赵惠燕, 汤兴春, 胡想顺. 不同紫外(UV-B)辐射时间对两种体色型麦长管蚜后代生物学特征的影响. 生态学报, 2010, 30(7): 1812-1816.

[2] 杜军利, 武德功, 张廷伟, 钱秀娟, 刘长仲. 不同紫外辐射时间对两种色型豌豆蚜后代生物学特性的影响. 草地学报, 2012, 20(5): 961-966.

[3] 袁伟宁, 吕宁, 孙小玲, 刘长仲. 连续 UV-B 胁迫对绿色型豌豆蚜生物学特性的影响. 中国生态农业学报, 2015, 23(8): 1020-1025.

[4] Antignus Y, Nestel D, Cohen S, Lapidot M. Ultraviolet-deficient greenhouse environment affects whitefly attraction and flight-behavior. Environmental Entomology, 2001, 30(2): 394-399.

[5] Veteli T O, Tegelberg R, Pusenius J, Sipura M, Julkunen-Tiitto R, Aphalo P J, Tahvanainen J. Interactions between willows and insect herbivores under enhanced ultraviolet-B radiation. Oecologia, 2003, 137(2): 312-320.

[6] Strid A, Chow W S, Anderson J M. Effects of supplementary ultraviolet-B radiation on photosynthesis in *Pisum sativum*. Biochimica et Biophysica

Acta (BBA)-Bioenergetics, 1990, 1020(3): 260-268.

[7] McCloud E S, Berenbaum M R, Tuveson R W. Furanocoumarin content and phototoxicity of rough lemon (*Citrus jambhiri*) foliage exposed to enhanced ultraviolet-B (UVB) irradiation. Journal of Chemical Ecology, 1992, 18(7): 1125-1137.

[8] 张文会, 张朋, 刘立科, 吕艳伟. 紫外线 B 辐射增强对大豆生长及光合作用相关指标的影响. 大豆科学, 2009, 28(2): 229-233.

[9] 张静, 王进, 田丽萍. 紫外线(UV-B)辐射增强对植物生长的研究进展. 中国农学通报, 2009, 25(22): 104-108.

[10] Kakani V G, Reddy K R, Zhao D, Sailaja K. Field crop responses to ultraviolet-B radiation: a review. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 120(1/4): 191-218.

[11] Kuhlmann F, Müller C. Impacts of ultraviolet radiation on interactions between plants and herbivorous insects: a chemo-ecological perspective. Progress in Botany, 2011, 72: 305-347.

[12] 张丽, 周冬, 杨杰, 朱国平, 赵惠燕, 胡祖庆, 胡想顺. UV-B 胁迫小麦上麦长管蚜的生命表参数和取食行为. 昆虫学报, 2013, 56(6): 665-670.

[13] 李军, 赵惠燕, 赵学达. 不同强度紫外线对蚜虫生态学特征及有关酶活性的影响. 西北农林科技大学:自然科学版, 2005, 33(4): 61-64.

[14] 姚建秀, 赵惠燕. 紫外条件诱导下麦长管蚜 DNA 的变异研究. 西北农业学报, 2001, 10(1): 33-36.

[15] 赵永田, 赵惠燕. 紫外线胁迫麦长管蚜 DNA 变异的 AFLP 分析. 生物技术通报, 2009, (10): 142-145,155-155.

[16] Mousseau T A, Fox C W. The adaptive significance of maternal effects. Trends in Ecology & Evolution, 1998, 13(10): 403-407.

[17] Mousseau T A, Dingle H. Maternal effects in insect life histories. Annual Review of Entomology, 2003, 36(1): 511-534.

[18] Tachibana S I, Numata H. Parental and direct effects of photoperiod and temperature on the induction of larval diapause in the blow fly *Lucilia sericata*. Physiological Entomology, 2004, 29(1): 39-44.

[19] 张欢, 唐宇, 张杰, 陈树德, 乔登江, 王向晖. 脉冲微波对雄性大鼠生殖系统及其子代的影响. 强激光与粒子束, 2015, 27(7): 300-306.

[20] 曹亚南, 张燕, 刘赟. 极低频电磁场对小鼠雌性生殖和子代生长发育的影响. 中华劳动卫生职业病杂志, 2006, 24(8):468-470.

[21] 张雅君, 梁佳勇, 曾慕衡. 紫外线对雄果蝇寿命及子代生理的影响. 天津农业科学, 2013, 19(7): 75-78.

[22] Chi H. TWOSEX-MSChart: a computer program for the age-stage, two-sex life table analysis. (2013). http://140.120.197.173/ecology/.

[23] Schauen M, Hornig-Do H T, Schomberg S, Herrmann G, Wiesner R J. Mitochondrial electron transport chain activity is not involved in ultraviolet A (UVA) -induced cell death. Free Radical Biology and Medicine, 2007, 42(4): 499-509.

[24] Yannarelli G G, Noriega G O, Batlle A, Tomaro M L. Heme oxygenase up-regulation in ultraviolet-B irradiated soybean plants involves reactive oxygen species. Planta, 2006, 224(5): 1154-1162.

[25] Nguyen T T, Michaud D, Cloutier C. A proteomic analysis of the aphid *Macrosiphum euphorbiae* under heat and radiation stress. Insect Biochemistry and Molecular Biology, 2009, 39(1): 20-30.

[26] 魏晓雪, 于景华, 李德文, 佟璐, 庞海河, 祖元刚. UV-B 辐射增强对红松幼苗针叶脂质过氧化及抗氧化系统的影响. 林业科学, 2011, 47(5): 54-59.

[27] 盖民昊, 陈堑, 胡祖庆, 胡想顺, 赵惠燕. 紫外诱导下麦长管蚜细胞色素 b 基因和 SOD 基因的克隆与序列分析. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2010, 38(11): 167-172.

[28] 都二霞, 赵惠燕, 郭剑文. 紫外线诱导对桃蚜生态学及线粒体基因 *COI*-II 突变的影响. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(9): 123-126,131-131.

[29] Thayer K A, Melnick R, Burns K, Davis D, Huff J. Fundamental flaws of hormesis for public health decisions. Environmental Health Perspectives, 2005, 113(10): 1271-1276.

[30] Stebbing A R. Hormesis — the stimulation of growth by low levels of inhibitors.Science of the Total Environment, 1982, 22(3): 213-234.

[31] Calabrese E J, Baldwin L A. The frequency of u-shaped dose responses in the toxicological literature. Toxicological Sciences, 2001, 62(2): 330-338.

[32] Calabrese E J, Baldwin L A. Hormesis: U-Shaped dose responses and their centrality in toxicology. Trends in Pharmacological Sciences, 2001, 22(6): 285-291.